第 38 卷第 4 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.4
2018 年 2 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611222378
樊才睿, 李畅游,孙标, 史小红, 杨芳, 高宏斌.放牧制度对草地产流产沙及氮磷流失的影响.生态学报,2018,38(4):1446-1457.
Fan C R, Li C Y, Sun B, Shi X H, Yang F, Gao H B.Characteristics of sediment content and phosphorus and nitrogen loss in surface runoff from different grazing grasslands.Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1446-1457.

放牧制度对草地产流产沙及氮磷流失的影响

樊才睿, 李畅游*, 孙　标, 史小红, 杨　芳, 高宏斌
内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特　010018

摘要:研究不同放牧制度草场水土流失过程,对草原生态环境保护和治理具有重要的理论意义。以内蒙古呼伦贝尔草原不同放牧草场为研究对象,设置选取三种放牧制度草场(自由放牧、轮牧、休牧),采用人工模拟降雨的方法进行 0.74mm/min 和 1.5mm/min雨强的降雨模拟试验,测定径流量,含沙量,径流和泥沙中总氮,总磷浓度,并探讨植被截留对径流的影响规律。结果表明:植被截留对减少降雨径流具有明显的作用,休牧草场径流系数减小最多,自由放牧草场减小最少,产沙量显示为自由放牧草场>轮牧草场>休牧草场。降雨强度对径流中的氮磷浓度影响显著,自由放牧草场总氮浓度和休牧草场总磷浓度受雨强影响最大,氮磷流失过程浓度变化曲线更符合幂函数分布。休牧草场泥沙氮含量和泥沙磷含量均为最高,自由放牧草场与休牧草场的总氮富集率基本相等且均大于轮牧草场,总磷富集率为自由放牧>休牧>轮牧,三种放牧草场氮磷和泥沙流失主要影响因素为径流量和含沙量。因此,适当的将呼伦贝尔草原自由放牧草场向休牧和轮牧草场转变,将有利于减少草场水土营养元素流失及草原生态可持续发展。

关键词:不同放牧制度;人工模拟降雨;总氮;总磷;泥沙

Characteristics of sediment content and phosphorus and nitrogen loss in surface runoff from different grazing grasslands

FAN Cairui, LI Changyou*, SUN Biao, SHI Xiaohong, YANG Fang, GAO Hongbin
Inner Mongolia Agricultural University, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010018, *China*

Abstract: Soil erosion is an important cause of grassland soil fertility loss and ecosystem degradation. The process of and degree of damage caused by soil and water loss will differ under different grazing systems because of different vegetation coverage rates, and this information is also important to instruct practices and governance polices for ecological and environment protection in the grasslands. The study area, the Hulunbuir grassland, located in the Inner Mongolia region of north China, is dominated by sandy soil and has been subject to grassland degradation and loss of area. In this area, we used different stocking rates to select three grazing system—free grazing, rotation grazing, and no-grazing systems—and then chose one grazing grassland in each system. We collected soil samples, and investigated vegetation growth conditions in all three grazing systems. We also assessed soil total phosphorus and total nitrogen. We uses a rainfall simulator to simulate two rainfall intensities—0.74 mm/min and 1.50 mm/min. Each rainfall intensity in the same grazing pasture two rainfall experiment. In each simulated rainfall experiment, we collected all the runoff in order to test runoff volume. When the rainfall began, we collected runoff samples every 3 min for a total of eight times. We tested runoff, sediments, total phosphorus, and total nitrogen of each runoff sample, and assessed the mechanism of phosphorus and nitrogen loss via rainfall runoff. The result shows that the stocking rates had important effects on reducing surface runoff and sediment

基金项目:国家自然科学基金项目(51339002,51409288,51509133,51569019,51669022);内蒙古农业大学优秀青年科学基金项目(2014XYQ-10);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20131515120005)

收稿日期:2016-11-22;　　**网络出版日期**:2017-11-12

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: nndlichangyou@163.com

between different grazing grassland types. The no-grazing system had the most reclining function and free grazing grassland had the least. With respect to silt content in runoff, free grazing was the least effective system and no-grazing the most effective, suggesting that no-grazing grassland would best reduce soil erosion. Tolerance of rainfall intensity differed under different vegetation coverage. The runoff coefficient was reduced 25.0%—45.7% for the no-grazing grassland under the two rainfall intensities; that of the rotation grazing grassland was reduced 13.2%—20.2%; and the free grazing grassland was reduced 7.5%—12.4%. Runoff nitrate concentrations were influenced significantly by rainfall intensity under the free grazing grassland (nitrogen loss significantly affected) and no-grazing grassland (phosphorus loss significantly affected). Moreover, the nitrogen and phosphorus loss curve followed a power function distribution. Soil and nutrient loss were mainly controlled by runoff volume and silt content in all three grazing systems. The nitrogen and phosphorus loss in sediment were highest under the no-grazing grassland. The rotation grazing system had the lowest enrichment rate. The greatest loss of nitrogen and phosphorus was observed in the free grazing grassland. Nitrogen in sediment first increased and then decreased with increasing grazing intensity. The distribution of phosphorus loss in sediment was contrary to that for nitrogen in the three grazing types. Enrichment was observed in the loss of both nitrogen and phosphorus in runoff. The free grazing grassland had the most significant effects on the main influences. Accordingly, these results could provide vital baseline information for choosing grazing methods and grassland management practices and could facilitate the reduction of nitrate runoff losses and encourage the development of adaptable grazing methods.

Key Words: different grazing systems; simulated rainfall; total nitrogen; total phosphorus; sediment

水土流失是地表土壤营养元素损失的主要途径。降雨作为水土流失的主要因素,直接影响土壤中营养元素的多少。降雨过程中雨滴的溅蚀和径流的冲刷,导致表层土壤中营养元素和泥沙颗粒随降雨径流进行迁移,从而造成土壤及氮磷元素的侵蚀。草原土壤与农田土壤相比,具有土壤氮磷含量少,生态脆弱性大、人工干预少、自然因素影响多等特点,一旦氮磷等营养元素发生流失,其短期内难以补充恢复。

对于水土流失的研究早在 20 世纪初就已经开始进行,但初期的研究仅针对于降雨对产流产沙过程的影响,忽略了流失过程中营养元素流失的问题[1],到 20 世纪 70 年代,以 Ahuja 等人[2-3]为代表的国外学者首先对营养元素随降雨径流的迁移过程展开了机理性的研究。而国内对营养元素的迁移研究主要从上世纪 90 年代国开始,以邵明安、王全九等人[4-6]为代表的研究者率先在黄土高原旱地农业区对降雨过程中营养元素流失进行了研究,从机理上分析了影响溶质迁移过程的主要因子,并建立了质量传递模型。而汤珊珊和郭新送[7-8]等人分别从土壤粒级富集和养分富集方面对降雨过程中土壤侵蚀的富集现象进行了探讨。目前国内对泥沙及营养元素迁移过程的研究主要通过模拟人工降雨或者天然降雨对不同土地利用方式下的流失差异性进行短期实验或者长期监测[9-10],在农田生态系统坡耕地[11],和水土流失严重的石漠区[12],黄土高原农田区以及一些喀斯特地貌地区[13]取得了较多的成果。同时由于草原利用方式的复杂性和广泛性,很少有研究者关注天然草甸地的水土及营养元素流失特征及其富集变化过程[14-15]。砂质草原生态环境脆弱,土壤氮磷元素来源单一,受放牧活动影响较大,不同的放牧方式及载畜率是草原土壤氮磷流失的关键。本文利用野外人工模拟降雨实验,研究非饱和水流条件下砂质土壤氮磷及泥沙随地表径流的迁移规律,进一步探讨土壤养分随降雨-入渗-径流相互作用下的迁移过程。

呼伦湖地处呼伦贝尔草原腹地,湖泊周边没有工业及农业污染,仅受放牧活动的影响,但近年来湖泊一直受到富营养化的困扰。很多研究者将富营养化的原因归结于放牧活动,而放牧活动载畜量的大小对湖泊污染的贡献,目前尚无定论。本研究针对天然植被自然条件下自由放牧、轮牧、休牧草场进行模拟降雨试验,模拟不同降雨条件下、不同放牧方式对草原营养元素流失过程及其主要影响因素进行研究,将湖泊周围的放牧活动污染由定性描述发展到定量研究,针对湖泊污染来源进行定量分析,对防治面源污染及缓解水土流失状况具有重要的现实及理论意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的试验区域为中国内蒙古呼伦贝尔草原的沙质草场,位于新巴尔虎右旗宝东苏木,地处呼伦湖流域,区域海拔 700—1000m。该区域气候为干旱半干旱气候,年平均温度-0.6℃—1.1℃,年降水量为 240.5—283.6mm,年蒸发量为 1455.3—1754.3mm,年平均风速为 3.38—3.92m/s,日照时数为 2694—3131h,全年无霜期为 110—160d[16]。试验区主要土壤为砂土及壤砂土,主要优势植被为羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等植被。其生长各项指标及土壤状况如表 1 所示。

表 1 休牧、轮牧、自由放牧草地植被、土壤状况

Table 1 Vegetation property and soil property in No grazing, Rotation grazing, Free grazing grassland

样地 Plot	株高 Height /cm	盖度 Coverage/%	叶面积指数 LAI/ (m^2/m^2)	土壤空隙度/%	土壤全磷 Soil total phosphorus/ (g/kg)	土壤全氮 Soil total nitrogen/ (g/kg)	土壤质地 Soil texture	地形 Terrain
ZY	10.5±2.54a	37±8.71a	1.37±0.15a	43.5±3.4a	0.44±0.11a	1.37±0.15a	砂土	平坦高原
LM	25.4±4.02b	70±3.07b	2.72±0.27b	43.4±1.7a	0.48±0.09b	1.92±0.17b	砂土	平坦高原
XM	37.8±5.26c	87±3.01c	4.36±0.20c	45.8±3.5c	0.84±0.16c	1.96±0.23b	壤砂土	平坦高原

a、b、c phosphorus;($p<0.05$),数据为平均值±标准差,重复为 6;ZY: 自由放牧 Free grazing; LM: 轮牧 Rotation grazing; XM: 休牧 No grazing

呼伦贝尔草原地处呼伦湖流域的核心区,草原利用方式复杂,简单概括可以分为三种放牧制度:自由放牧草场、轮牧草场、休牧草场。本研究于 2014 年夏季在呼伦贝尔草原南部的新巴尔虎右旗的宝东苏木选取具有代表性载畜量的三种放牧制度草场进行降雨模拟实验。其位置分别是自由放牧(N 48°27′55″、E 117°16′20″);轮牧(N 48°28′33″、E 117°13′09″);休牧(N 48°28′33″、E 117°11′41″);其中自由放牧草场理论载畜率为 200 羊/km^2,实际载畜率可以达到 800 羊/km^2;轮牧草场主要为小区域的划区轮流放牧,周期为 60d,每区域连续放牧 15d,草场理论载畜率 400 羊/km^2,实际载畜率 500 羊/km^2;休牧草场主要为封围禁牧,半年以上无载畜,并在秋季进行刈割打草[17]。

在选定的三种放牧草场进行降雨模拟试验,并对各草场的植被生长状况及土壤状况进行调查研究,植被数据测定采用样方法,在三种放牧制度草场中选取三块地形平坦的草地(5m×5m),随机选取 5 块(1m×1m)的样方,设置 3 个重复。测定盖度、株高、株密度、根系深度等植被指标。测定表层 0—10cm 土壤的理化性质:土壤含水率、容重、孔隙度、土壤全氮、土壤全磷等指标。

1.2 试验设计与指标测定

1.2.1 人工降雨模拟器

为研究不同放牧制度草场,雨强与氮磷流失关系,本研究采用自制的管网式人工降雨模拟器进行不同降雨强度的模拟试验,人工降雨模拟器的有效降雨高度 2.5m,供水管线压力为 0—100kPa 之间,有效降雨面积为 1.8m×1m。该模拟器主要包括动力供水系统(水箱、发电机、水泵)、供水管线及回水系统、支架及辅助系统 3 部分组成如图 1 所示。降雨器为竖状排列的具有均匀小孔的 PVC 管构成,模拟器降雨强度通过调节流量大小实现雨强的改变,在径流小区周围采用钢性挡板进行防护,布置 V 型引流槽于试验区域的下坡向,以便在降雨产生径流后,将径流引导流入收集装置内。

降雨强度的测定,是通过调节单位时间 t 内的进水管流量 Q_1 与回流管的流量 Q_2,确定降雨量。试验过程中采用 5 个量雨筒呈 Z 型排列,计算雨强,雨强计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{H_i}{t}}{n} \tag{1}$$

式中:I 为降雨强度(mm/h);H_i 为测点雨量筒的水量(mm),$i=1,2,\cdots5$;t 测量时间(h),$t=0.5h$;n 为测点数

目,$n=5$。

降雨均匀性的测定采用 10 个相同规格大小的烧杯(500mL),摆放成“S”形,降雨区内同一平面上接水,计算降雨均匀性,该降雨模拟器均匀度为 84%。降雨均匀度公式:

$$K = 1 - \frac{\sum |H_i - H|}{nH} \tag{2}$$

式中:H_i 为降雨面积上的测点雨量(mm);H 为测点平均降雨量(mm);n 为测点数目,$n=10$。

雨滴直径分布,利用色斑法测定雨滴粒径,其原理是雨滴在同一材料上形成的色斑大小与雨滴粒径的大小成正比关系。首先率定出雨滴直径与色斑直径的关系式,然后用涂抹过品红与消石粉的滤纸作为测定雨滴终点速度的色斑载体,率定关系式为:

$$D = 0.347d^{0.763} \tag{3}$$

式中:D 为雨滴实际直径,d 为滤纸色斑直径。

1.2.2　降雨模拟试验设计

根据呼伦贝尔地区海拉尔气象站,满洲里气象站,新巴尔虎左旗气象站,1956 年至 2014 年的降雨资料显示,单日最大降雨量为 1998 年 7 月 19 日新巴尔虎右旗 72.2mm,根据实验过程中三种放牧草场可产生稳定径流的临界雨强,本研究选取 0.74mm/min 和 1.5mm/min 两种雨强进行小坡度的降雨试验模拟,历时 40min 左右,坡度维持在 4°—5°。分别在休牧、轮牧、自由放牧草场进行降雨模拟试验。每种雨强设置 3 个重复。降雨试验开始后,用秒表计时,记录下产流时间,产流后每三分钟采集一次径流样品,采集 8 次径流样品,径流水样用量筒测定体积后,装入 1000mL 的聚乙烯水样瓶,带回实验室测定泥沙含量及各项水质指标,降雨过程中收集雨水作为空白对照。

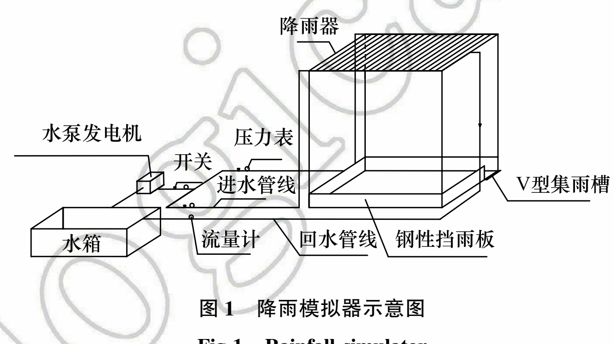


图 1　降雨模拟器示意图

Fig.1　Rainfall simulator

1.2.3　植被指标测定

株高:在每种放牧草场对主要优势植被进行测量,每种主要植被随机选取 40 株用卷尺现场测量其高度,取均值。

株密度:在野外实地对 1m×1m 样方内的所有植被数目进行记录,重复 5 次。

植被覆盖度:盖度观测使用照相法,采用数码相机对三种放牧制度下的样方区域垂直摄像,利用计算机图像处理技术提取植被信息,计算出其所占的百分比,重复 5 次。

植被截留量:采用基于人工模拟降雨实验的水量平衡法测定植被截留量,重复 3 次[17]。测定时间选在中午阳光照射强烈的时段进行。实验期间风速为微风,湿度 37%—56%。由于降雨历时较短,降雨过程中顶部遮挡阳光,所以降雨期间蒸发量忽略不计,雨强采用 1.17mm/min,降雨历时 5 分钟。土壤水分增加量用称重法测得,即降雨前后土壤重量差值。

水量平衡方程为:

$$S=Pg-Sn-E \tag{4}$$

式中,S 为植被冠层截留量;E 为降雨期间蒸发量;Pg 为总降雨量;Sn 为土壤水分增加量。

1.2.4　土壤及径流指标测定

土壤含水率、容重:利用烘干法测量环刀烘干前后的重量;土壤容重=(烘干后重量-环刀重量)/环刀体积;土壤含水率=(烘干前重量-烘干后重量)/环刀体积,重复次数为 3 次;土壤空隙度=(1-土壤容重/土壤密度)×100%。

土壤全氮和泥沙全氮:利用凯氏定氮仪参照半微量开氏法(GB7173-87)测定土壤中全氮的含量,每批样

品做两次重复。

土壤全磷和泥沙全磷:利用微波消解仪和紫外可见分光光度计参照硝酸-硫酸消解法(GB9837—1988)测定土壤中全磷的含量,每批样品做两次重复。

径流中总磷采用钼酸铵分光光度法,参考 GB11893—1989,利用 HITACHI U-2001 紫外/可见光分光光度计进行测定。

径流中总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,参考 GB11894—1989,利用 HITACHI U—2001 紫外/可见光分光光度计进行测定。

泥沙含量:采用过滤烘干法,对过滤径流样品的滤纸,称量其烘干前后的质量差,计算泥沙含量。

2 结果与分析

2.1 放牧制度对径流量和产沙量的影响

降雨径流过程中,不同放牧制度对营养元素流失的影响主要体现在草地植被茎杆的拦蓄作用和对径流的分散作用以及植被根系对土壤的固定作用。径流和泥沙是营养元素流失的主要载体,其中植被根系对土壤孔隙度容重产生影响,而土壤的容重空隙控制着径流入渗速度,从而影响径流量的大小,草地植被通过减少径流和泥沙侵蚀从而实现对土壤养分的保持作用。不同覆盖度下植被对坡面水土养分流失的影响也不同,对降雨过程中径流的减少起到不可代替的作用。

图 2 显示了不同放牧草场径流系数、输沙率随降雨历时变化的情况。由图 2 可知,三种放牧草场的径流系数变化特征相似,降雨径流系数初期随降雨时间递增,三种放牧草场在 0.74mm/h 雨强下,约在 21min 后达到稳定状态,而 1.50mm/h 雨强下,大约 15min 之后达到稳定状态。从图 2 中可以看出,在不同降雨强度下,自由放牧草场径流量最大,休牧草场径流量最小,对其进行单因素方差分析,两者间径流系数存在显著差异($P<0.05$),这说明放牧类型不同对降雨径流的拦蓄作用不同,其中自由放牧草场拦蓄径流最弱。

由于不同放牧草场植被存在截留作用,每次大于 0.5mm/min 的单次降雨过程中,自由放牧、轮牧、休牧草场的截留量分别为 0.957、0.613、0.431mm[17]。降雨历时越长,降雨强度越大,截留作用越弱,本次实验过程中由于降雨历时较短,所以三种放牧草场的植被截留作用对径流量影响明显。降雨过程中降落的雨滴首先到达植被叶片表层,被吸附截留,无法截留的雨滴会沿植被茎叶掉落到土壤表面,继续入渗或形成径流。植被截留对降雨起到了的缓冲作用并在径流过程中起到明显的减缓,可有效的减小径流系数。由表 2 可以看出,在两种降雨强度下,休牧草场径流系数减少最多 25.0%—45.7%,轮牧草场减少量次之 13.2%—20.2%,自由放牧草场减少最小 7.5%—12.4%。

表 2 三种放牧草场总径流系数

Table 2 Runoff coefficient in three grazing grasslands

雨强 Rainfall intensity/(mm/min)	自由放牧 Free grazing		轮牧 Rotation grazing		休牧 No grazing	
	考虑截留 Retention	不考虑截留 No retention	考虑截留 Retention	不考虑截留 No retention	考虑截留 Retention	不考虑截留 No retention
0.74	0.196	0.220	0.171	0.206	0.118	0.172
1.5	0.159	0.171	0.129	0.146	0.106	0.133

在降雨条件下,不同放牧制度草场的减少侵蚀作用主要体现在植被覆盖度的增加,减少水流流速,增加入渗,减少径流量,从而减少侵蚀力。从图 2 可以看出,径流过程中输沙率呈波动式下降,三种放牧草场其输沙峰值均出现在产流初期,随后随径流量的增加逐步减少,最后达到稳定状态。主要由于产流初期降雨冲刷作用强烈,土壤侵蚀发育迅速,产沙量急剧上升。随着表层土壤逐渐被降雨剥离侵蚀,输沙速率开始下降,并最终达到稳定状态。对相同放牧草场不同降雨强度下的输沙率进行单因素方差分析,两者间存在显著差异($P<0.05$),说明雨强度的增加对输沙率产生显著影响。输沙率的大小反应了降雨对土壤侵蚀的程度,从图 2 可以

看出,土壤侵蚀的大小顺序为自由放牧草场>轮牧草场>休牧草场。休牧草场累计产沙量是自由放牧草场的1.47—1.72 倍,说明休牧草场对于减少土壤侵蚀和泥沙拦截的作用要优于自由放牧草场。自由放牧草场的径流系数与输沙率均达到最大,说明植被覆盖度对坡面径流和输沙机制具有十分重要的影响。

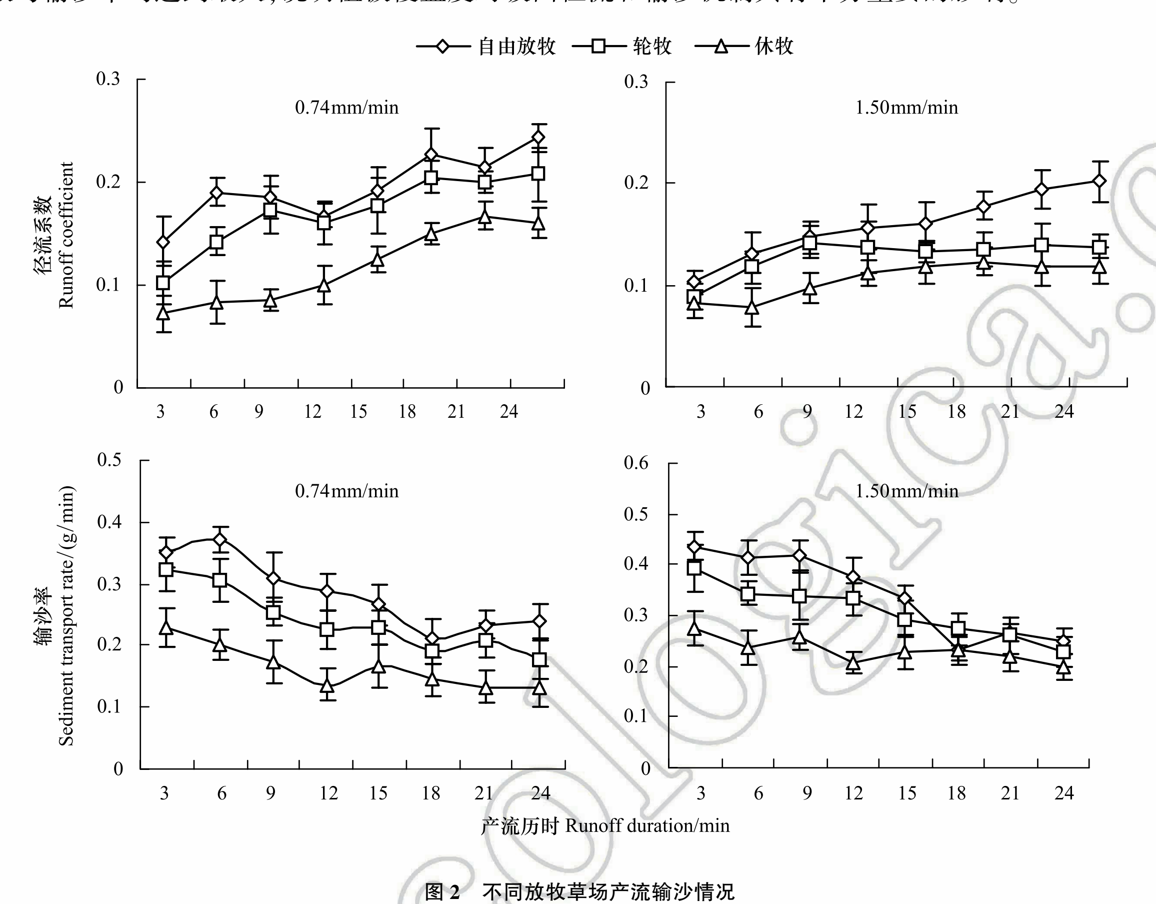


图 2　不同放牧草场产流输沙情况

Fig.2　Characteristics of runoff and sediment under different grazing grassland

2.2　放牧制度对氮磷流失过程的影响

不同放牧草场土壤中营养元素含量存在差异,而在降雨过程中影响径流养分浓度的主要因素为降雨量、地表植被类型和覆盖度。放牧制度对植被类型及覆盖度产生显著影响,植被类型和覆盖度又对坡面径流中养分浓度变化特征产生影响。

图 3 显示了不同降雨强度下径流中总氮和总磷的浓度随时间变化的情况,从图中可以看出,不同放牧制度草地径流中总氮、总磷浓度随时间的变化趋势基本相似。两者均是在降雨产流初期浓度值大达到最大,而随着产流时间的持续,浓度值衰减到一个稳定值上下波动。其中在总氮浓度变化范围较大,在 0.83—1.74mg/L 之间变动,存在明显的下降趋势,而总磷浓度变化较小,在 0.25—0.56mg/L 之间变动,其下降趋势较缓和。总磷相对于总氮而言更先趋于稳定,主要由于磷吸附性较强,随径流溶解的较少。降雨强度对径流中氮磷的影响显著,总氮、总磷浓度均随降雨强度的增加而显著增加。对总氮浓度变化进行分析可以看出,其中自由放牧草场受降雨强度影响最大,浓度增加了 0.096mg/L,轮牧草场影响最小,浓度仅增加 0.053mg/L。对总磷浓度变化进行分析,休牧草场受降雨强度影响最大,1.5mm/L 雨强下的总磷浓度比 0.74mm/L 的浓度增加了 0.056mg/L,轮牧草场受雨强变化的影响最小,浓度增加了 0.029mg/L。

目前国内外学者针对径流过程中养分浓度变化总结出很多模型,就模型结构和形式而言,大致可以分为幂函数模型和指数函数模型两类[18]。本研究分别利用幂函数和指数函数分别描述不同放牧草场径流中总氮和总磷浓度变化过程,见表 3,从表中可以看出,幂函数比指数函数可以更好的模拟径流中总氮、总磷浓度变化过程,而利用幂函数拟合总磷的效果要优于总氮的拟合效果,在不同降雨强度下决定系数均大于 0.9。因此

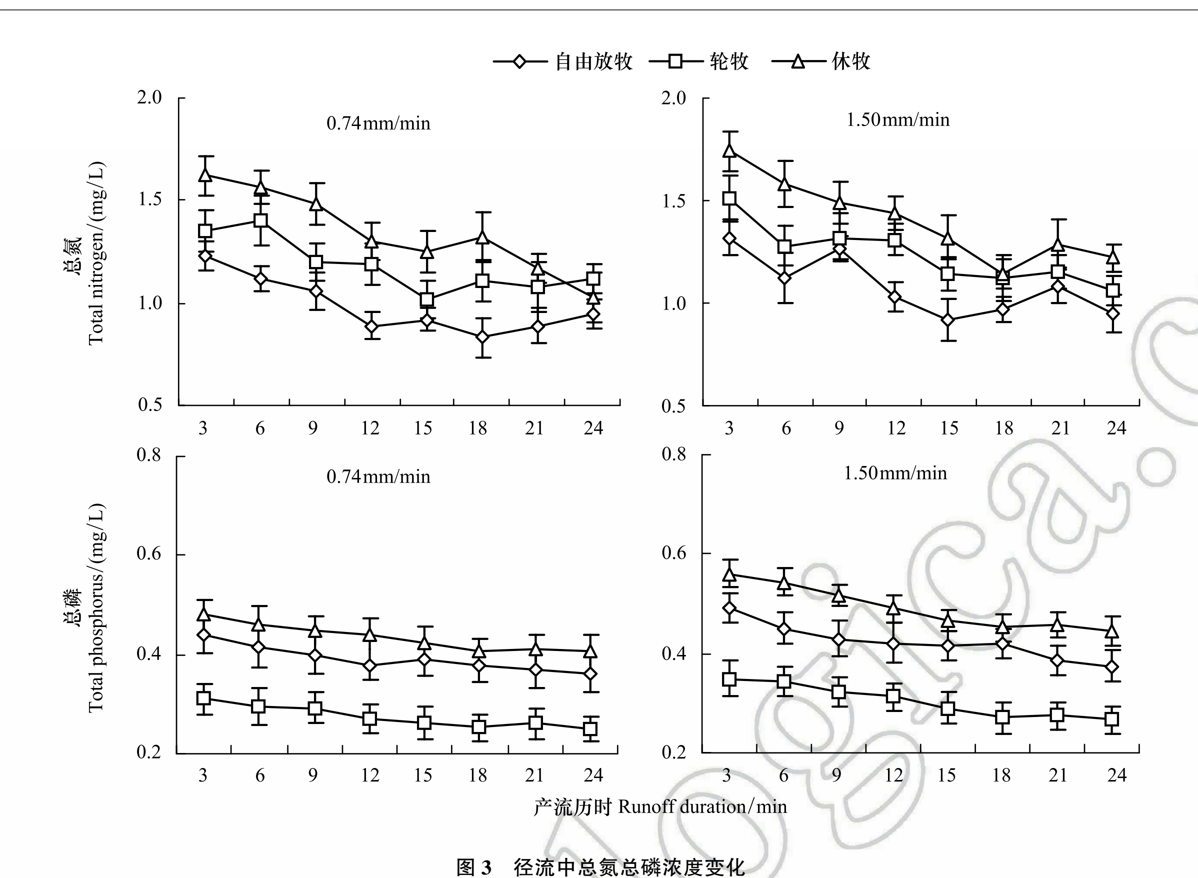


图 3 径流中总氮总磷浓度变化

Fig.3 Chang of nitrogen and phosphorus concentration in runoff

在降雨过程中,可以利用幂函数类型的模型方程来估算不同放牧草场土壤养分流失浓度。

表 3 不同放牧草场总氮和总磷浓度拟合

Table 3 Fitting process of nitrogen and phosphorus concentration in different grazing grassland

养分类型 Nutrient types	降雨强度 Rainfall intensity /(mm/min)	类型 Types	幂函数 Power function	R^2	指数函数 Exponential function	R^2
总氮	0.7	XM	$y=1.725x^{-0.197}$	0.83	$y=1.736e^{-0.06x}$	0.92
Total nitrogen		LM	$y=1.401x^{-0.131}$	0.72	$y=1.382e^{-0.036x}$	0.64
		ZY	$y=1.225x^{-0.17}$	0.79	$y=1.19e^{-0.044x}$	0.63
	1.5	XM	$y=1.779x^{-0.186}$	0.87	$y=1.759e^{-0.052x}$	0.83
		LM	$y=1.504x^{-0.153}$	0.86	$y=1.494e^{-0.043x}$	0.84
		ZY	$y=1.311x^{-0.15}$	0.63	$y=1.289e^{-0.041x}$	0.56
总磷	0.7	XM	$y=0.486x^{-0.084}$	0.94	$y=0.484e^{-0.024x}$	0.93
Totalphosphorus		LM	$y=0.316x^{-0.109}$	0.91	$y=0.314e^{-0.031x}$	0.89
		ZY	$y=0.44x^{-0.089}$	0.95	$y=0.436e^{-0.025x}$	0.88
	1.5	XM	$y=0.576x^{-0.122}$	0.94	$y=0.573e^{-0.035x}$	0.94
		LM	$y=0.366x^{-0.147}$	0.90	$y=0.367e^{-0.043x}$	0.95
		ZY	$y=0.492x^{-0.115}$	0.92	$y=0.489e^{-0.034x}$	0.90

x 为时间,y 为浓度

2.3 放牧制度对泥沙养分浓度变化影响

从图 4 可以看出,不同放牧草场降雨径流中泥沙养分随产流历时变化的过程,总氮在不同降雨强度下其变化过程基本相似,随降雨历时的增加氮含量逐渐下降,三种放牧草场总氮含量均在产流后 5min 内迅速减少,并保持在一定范围内波动。相同放牧草场在高降雨强度下,泥沙中总氮含量明显升高。可以明显看出,休

牧草场泥沙中氮含量明显高于轮牧及自由放牧草场。单因素方差分析显示,三种放牧草场间泥沙总磷含量差异显著($P<0.05$)。图 4 显示了三种放牧草场径流泥沙中总磷含量随产流历时的变化过程,与总氮不同的是总磷随时间降低趋势较缓和,主要由于磷具有较强的吸附性,所以泥沙中磷元素在产流各个阶段均较多,不会出现总氮突然下降的趋势。休牧草场泥沙中总磷含量最高,轮牧草场最低,单因素方差分析显示,休牧草场与轮牧、自由放牧草场间差异显著($P<0.05$),而轮牧草场与自由放牧草场间差异不显著($P>0.05$)。

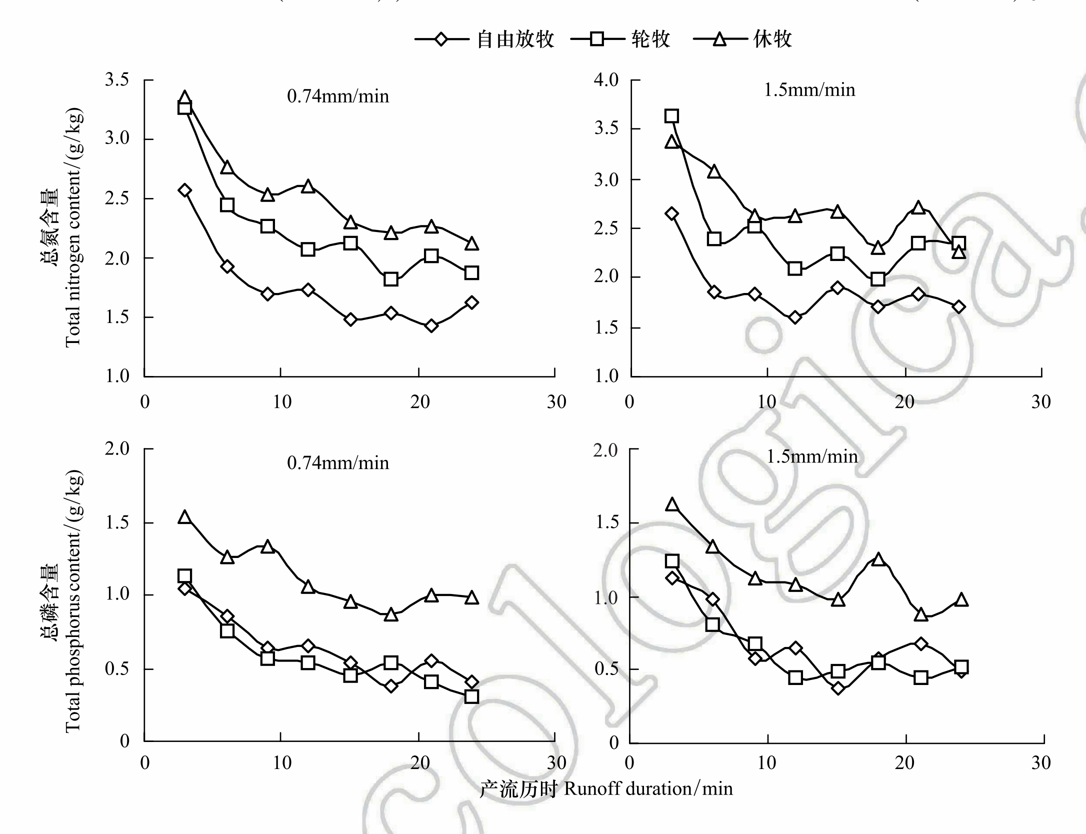


图 4　不同放牧草场径流中泥沙养分含量变化

Fig.4　Dynamics of nutrient concentration in sediment

表 4　不同放牧草场累计泥沙量及营养元素富集率

Table 4　Cumulative sediment and nutrient enrichment ratio under different grazing grassland

降雨强度 Rainfall intensity/(mm/min)	类型 Types	累计泥沙量 Cumulative sediment/g	泥沙养分含量 Sediment nutrient content/mg		营养元素富集率 nutrient enrichment ratio	
			总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus
0.74	ZY	6.81	11.93	4.29	1.28	1.43
	LM	5.75	12.85	3.38	1.16	1.22
	XM	3.96	9.97	4.46	1.29	1.34
1.50	ZY	8.17	15.43	5.54	1.38	1.54
	LM	7.39	18.11	4.77	1.28	1.34
	XM	5.56	15.04	6.43	1.38	1.38

对三种放牧草场在不同降雨强度下的泥沙中总氮、总磷流失量进行分析,见表 4,可以看出,三种放牧草场泥沙中总氮的流失量均显示为随放牧强度的增加先增加后减小,总磷的变化则与总氮变化完全相反。当降雨强度从0.74mm/min 增加到 1.5mm/min 时,自由放牧草场总氮、总磷流失量分别增加了 29.34%和 29.23%,轮牧草场增加了 40.94%和 41.14%,休牧草场增加了 50.83%和 44.22%。可以看出,泥沙中营养元素的流失量与雨强、泥沙中小微粒[19]所占比例均呈正相关,说明大雨强事件时,土壤侵蚀引起的养分流失主要由流失成

分所决定。

在降雨土壤侵蚀的过程中,养分在泥沙中存在富集现象,即泥沙中养分含量高于实验区土壤中养分含量。富集现象的出现主要是由于水土流失过程中,土壤中细小的颗粒有机质具有较大的比表面积,可以吸附更多的养分,这些颗粒十分细小,容易进入降雨侵蚀的泥沙中。20 世纪中期 Massey 等人提出了富集率的概念,用来描述土壤侵蚀过程中养分富集的程度,养分富集率就等于它在泥沙中的含量与源土壤中的含量之比[20]。

本次试验中总氮、总磷的富集率结果见表 4,自由放牧草场与休牧草场的总氮富集率基本相等,而轮牧草场的富集率明显要低于休牧及自由放牧草场。总磷富集率显示为自由放牧>休牧>轮牧。降雨强度由0.74 mm/min 增加到 1.5mm/min 时,三种放牧草场的氮磷的富集率均呈增加趋势,其自由放牧草场的总氮、总磷富集率分布增加了 7.7%和 7.61%,轮牧草场增加 9.68%和 9.83%,休牧草场增加了 7.34%和 2.64%。总体显示总氮的富集率在 1.16—1.38 之间,总磷的富集率在 1.22—1.54 之间,富集率大小符合国内外众多实验结果范围[18],未出现异常情况。

2.4 泥沙及氮磷流失的主要影响因素

对不同放牧制度草场泥沙流失量、总氮流失量、总磷流失量与各因素间相关性进行分析,由表 5 可以看出,不同放牧草场泥沙及氮磷流失量的影响因素较多,但主要影响因素基本相同。三种放牧草场中影响总氮流失量的因素有径流量、含沙量及总氮浓度。其中径流量与总氮流失量的相关性远高于其他两个因素,相关系数达到 0.9 以上,总氮浓度对总氮流失量的影响低于径流量对其影响,主要由于总氮浓度大小受到径流量的制约,因此径流量是影响氮流失的第一影响因素。泥沙含量与总氮流失量间呈负相关关系,主要由于泥沙含量随降雨历时逐渐减少,而总氮流失量随时间累积增多。影响总磷流失量大小的影响因素与总氮相同,其主要影响因素同样是径流量。

泥沙流失量除不受入渗量影响外,均受其他各个因素的影响,其中径流量与含沙量对泥沙流失量的影响明显高于其他各因素,自由放牧草场和轮牧草场的泥沙流失量与径流量、含沙量间相关系数可达 0.9 以上,而休牧草场的相关系数也达到 0.8 以上,主要由于休牧草场的植被生长状况均优于自由放牧草场与轮牧草场,且差距显著($P<0.05$),植被生长状况对各个因素与流失量间的关系产生一定影响,所以其相关性要低于自由放牧草场和轮牧草场。而在径流量与含沙量中,含沙量与泥沙流失量的相关系数又略高于径流量,说明三种放牧草场中含沙量是决定泥沙流失量的最主要因素。

表 5 不同放牧草地泥沙、总氮、总磷流失因素间相关系数

Table 5 Correlation coefficients between sediment, total nitrogen, and total phosphorus in different grazing grassland

放牧类型 Grazing types	种类 Types	径流量 Runoff	入渗系数 Infiltration coefficients	含沙量 Sediment content	泥沙氮浓度 Sediment nitrogen	泥沙磷浓度 Sediment phosphorus	总氮浓度 Total nitrogen concentration	总磷浓度 Total phosphorus concentration
自由放牧	TN 流失量	0.92**	-0.184	-0.519*	0.018	-0.08	0.865**	0.174
	TP 流失量	0.968**	-0.134	-0.636*	-0.087	-0.2	0.059	0.727*
	泥沙流失量	-0.903**	0.165	0.934**	0.627**	0.696**	0.824**	0.842**
轮牧	TN 流失量	0.923**	-0.284	-0.508*	-0.08	-0.185	0.791*	0.321
	TP 流失量	0.93**	-0.305	-0.614*	-0.083	-0.184	0.029	0.644*
	泥沙流失量	-0.94**	0.052	0.945**	0.742**	0.738**	-0.845**	0.852**
休牧	TN 流失量	0.924**	-0.085	-0.592*	0.043	-0.175	-0.722*	0.436
	TP 流失量	0.868**	-0.169	-0.656**	-0.062	-0.228	-0.168	0.545*
	泥沙流失量	-0.801**	0.338	0.861**	0.626**	0.571*	0.629**	0.757**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

3 讨论

草地植被具有调节地表径流,保持水土防止流失的重要生态功能,呼伦贝尔草原作为面积最大的天然草

原,其生态环境一直备受关注,草原上放牧方式不仅决定草地植被的生长状况,也改变着下垫面土壤的理化性质,而土壤的理化性质影响土壤的水文循环,进而影响植被的生长状况及降雨过程中土壤的侵蚀程度。本文以呼伦贝尔草原不同放牧制度草场为研究对象,在对土壤植被进行调查研究的基础上,探讨了模拟降雨过程中不同放牧制度对氮磷和泥沙流失特性的影响。

降雨产流产沙过程主要是降雨对地表土壤做功的过程,三种放牧草场在不同降雨强度下产流产沙存在较大差异,主要由于降雨过程中自由放牧草场植被生长稀疏矮小,其覆盖度 35%—48%,雨滴到达土壤表面所携带的降雨动能直接被表层土壤所吸收,由于动量守恒,土壤受雨滴动能的影响产生扰动,在其现有土壤孔隙度的基础上,受降雨扰动的微粒堵塞土壤孔隙,使土壤入渗率下降,产流增多,较大的降雨径流对表层土壤形成冲刷,使泥沙更多的进入径流,随降雨强度的增加,雨滴动能增大,径流受降雨影响更显著。在休牧草场,其植被覆盖度可以达到 83%—92%,降雨过程中雨滴所携带的动能先到达地表植被,在植被截留后,沿植被茎叶掉落到土壤表面。由于土壤表层植被的存在使降雨动能减小,减少对土壤的扰动,增加了入渗,降低径流。随降雨强度的增加,植被的缓冲作用逐渐减弱,甘艺贤等[21]的研究表明,在降雨强度达到 80mm/h 时,径流强度随雨强的增加而逐渐变大,雨强对产流产沙存在直接影响。本文的试验结果与甘艺贤等人的研究基本一致。

在降雨侵蚀过程中不同放牧草场土壤侵蚀前后,原土壤的机械组成发生了明显的变化,其变化过程就是径流与土壤颗粒相互作用的过程。当降雨产生径流时,径流作为泥沙流失的源动力及载体,将土壤中粒径微小的粘粒、粉粒携带进入径流中,导致径流中的泥沙中细小的粘粒、粉粒所占百分比较原土中要高出很多,实现了泥沙中粘粒、粉粒的聚集。粘粒、粉粒具有较大的比表面积,与土壤中的氮磷结合更多。三种放牧草场中自由放牧草场与休牧草场的总氮富集率基本相等,均大于轮牧草场,总磷富集率显示为自由放牧>休牧>轮牧,与泥沙流失量变化不一致。该结论与王全九在神木对不同种植模式下氮磷流失规律的研究趋势相反,王全九等[6]认为不同植被种植模式下的富集率与产沙量呈完全相反的关系,既土壤侵蚀量低值对应的富集率的高值。该状况主要由于王的实验小区提前喷洒了氮磷农药,使不同种植模式下土壤中的氮磷元素含量基本一致。而本研究选取的天然试验草场中,土壤氮磷含量本底值相差较大,休牧草场的氮含量约为轮牧及自由放牧草的 1.9 倍,休牧及轮牧草场的磷含量约为自由放牧草场的 1.4 倍,虽然自由放牧草场产沙量最大,但是由于其土壤氮磷含量较低,所以其泥沙富集率与休牧草场相近。三种放牧草场的泥沙富集率随泥沙累计量的增加逐渐减小,该结果与郭新送等[8]在室内对棕壤、褐土、红壤土在室内进行降雨模拟实验取得的氮磷钾的富集率变化结果一致。该结果显示在可产生径流的降雨事件中,泥沙养分的富集率随着降雨发生次数的增加逐渐降低,多次发生降雨产流的地区其土壤中营养元素的含量会逐渐降低,土壤会日渐贫瘠,最终导致生态环境恶化。

降雨过程中存在很多因素影响氮磷及泥沙流失,其中下垫面条件对流失量的影响起到至关重要的作用。不同放牧草场下垫面条件差异很大,自由放牧草场土壤氮磷含量低,土壤孔隙度小,植被生长稀疏;轮牧草场氮含量较高,磷含量与自由放牧草场相近,土壤孔隙度最小,植被生长良好;休牧草场土壤氮磷含量及孔隙度均达到最大,且植被生长最为茂盛。由于地表状况的差异导致了三种放牧草场在相同降雨强度下,氮磷及泥沙流失的差异性。不同放牧草场中含沙量对径流过程中总氮、总磷流失量的影响存在明显的差异,自由放牧草场径流中含沙量对氮磷流失量的影响差距最大,而休牧草场差距最小,主要由于休牧草场地表土壤受雨滴扰动要轻于自由放牧草场,所以其含沙量较少,对氮磷流失量的贡献较少。该结果与张丽萍等[22]在竹林地进行泥沙及氮磷载荷流失的研究趋势基本一致,结果显示泥沙流失量对氮磷流失起到主要影响作用。

三种放牧草场中含沙量对磷流失量的影响明显高于对氮流失量的影响,主要由于流失泥沙中细颗粒的粘粒、粉粒具有较大的比表面积,而同时磷颗粒具有较强的吸附性,会更多的吸附在粘粒与粉粒上,在泥沙中随径流流失,而径流中的泥沙微粒吸附的磷较多,导致径流中磷浓度较高。该结果与 2009 年赵伟等[14]与呼伦湖流域不同草地利用方式下的降雨模拟实验取得结果基本一致,赵伟等人认三种草地利用方式中,磷流失与泥沙含量相关性较高,氮的流失除受泥沙流失的影响外,还受土壤氮含量等方面的影响,但赵伟等人并未对氮

磷及泥沙流失过程中的富集现象进行测试说明。而余雕等[23]在黄土高原地区进行的泥沙侵蚀的结果趋势并不相同。余雕等人认为流失泥沙中细小颗粒与磷的吸附性不强,没有出现磷富集的现象,该状况可能由于研究区的本底情况相差较大,黄土土壤中磷含量较低,无法形成富集,部分学者对水体沉积物中的氮磷释放过程进行研究,结果表明当水体氮磷元素浓度减少时,泥沙中的氮磷元素会逐步释放到水体中[24],引起二次污染,所以要减少易造成土壤退化和营养元素流失的自由放牧草场面积,加强生态环境恢复。

呼伦湖是内蒙古最大的淡水湖泊,地处呼伦贝尔草原腹地,其主要入湖河流为克鲁伦河及乌尔逊河,其中克鲁伦河发源于蒙古国肯特山,在国外长度为1058km,国内部分206km,水质较差,总氮浓度均值可达2.5mg/L,总磷浓度均值0.23mg/L[25]。乌尔逊河长223km,发源于贝尔湖,贝尔湖是中蒙界湖,不存在任何人为活动的影响,其湖水水质较好,乌尔逊河总氮浓度均值1.02mg/L,总磷浓度均值0.21mg/L,两条河流穿过呼伦贝尔草原腹地,河流水质均受两岸放牧活动的影响。不同放牧草场在两种降雨强度下径流中总氮浓度范围为0.99—1.4mg/L,该浓度远低于克鲁伦河河水中总氮浓度值,可以看出在设定降雨强度下,放牧活动对克鲁伦河河流水质的影响不大,降雨径流进入河水中,反而会降低河流中总氮浓度。该状况可能由于克鲁伦河国内部分水质受上游来水影响较大,氮元素随上游坡面径流进入河水中逐步累积,导致国内段河水总氮浓度较高[25]。而径流中总氮浓度与乌尔逊河河水总氮浓度相接近,且稍高出乌尔逊河水浓度,可以看出,在小降雨事件中的坡面径流对河水中总氮浓度没有影响,但在大雨强事件时,坡面汇流对提高乌尔逊河总氮浓度起到贡献作用。径流中磷的浓度范围为0.27—0.49mg/L,该浓度范围明显高于乌尔逊河和克鲁伦河河水中,可以看出,不论是大雨强或者小雨强事件,只要产生的坡面径流进入河水,均会明显提升河水总磷浓度。所以,放牧草场中磷元素是呼伦湖入湖河流的主要污染源之一,而氮元素不对入湖河流产生污染,其污染物另有来源。

4 结论

(1)不同放牧制度草场对降雨径流及产沙量具有明显的减缓作用,随三种放牧草场草地覆盖度的增高,产流产沙强度降低,三种放牧草场对产流产沙削减作用的顺序为休牧草场>轮牧草场>自由放牧草场。

(2)降雨强度对径流中的氮磷浓度影响显著,其中自由放牧草场总氮浓度和休牧草场总磷浓度受雨强影响最大。三种放牧草场的总氮、总磷浓度变化过程曲线,更符合幂函数。自由放牧草场总磷、总氮流失量均最高。

(3)休牧草场泥沙氮含量和泥沙磷含量均为最高,三种放牧草场泥沙中总氮流失量随放牧强度的增加先增大后减小,总磷的变化完全相反。氮磷在流失过程中均存在富集现象,自由放牧草场与休牧草场的总氮富集率基本相等且均大于轮牧草场,总磷富集率为自由放牧>休牧>轮牧。

(4) 三种放牧草场氮磷流失的第一影响因素为径流量,泥沙流失的第一影响因素为含沙量,三种放牧草场中,自由放牧草场氮磷和泥沙流失受径流量及含沙量的影响最为显著($P<0.05$)。

由以上结论可以看出,休牧及轮牧草场对氮磷及泥沙流失的保护作用显著。因此在草地生态可持续发展中应逐步转变放牧方式,以此来减少水土流失,休养草原,改善区域生态环境条件,对于流域水体中氮磷元素的控制需要另寻它法。

参考文献(References):

[1] 郑粉莉, 王占礼, 杨勒科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望. 自然杂志, 2008, 30(1): 12-16.

[2] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(2): 312-321.

[3] Ahuja L R. Characterization and modeling of chemical transfer to runoff//Stewart B A. Advances in Soil Science. New York: Springer, 1986: 149-188.

[4] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型. 世界科技研究与发展, 2001, 23(2): 7-12.

[5] 王全九, 王辉. 黄土坡面土壤溶质随径流迁移有效混合深度模型特征分析. 水利学报, 2010, 41(6): 671-676.

[6] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 张鹏宇, 柴晶. 植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.
[7] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 唐辉, 王添. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47.
[8] 郭新送, 宋付朋, 高扬, 马富亮. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应. 水土保持学报, 2014, 28(3): 23-28.
[9] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
[10] 李波, 李晔, 韩惟怡, 秦华, 赵建博. 人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析. 水土保持学报, 2016, 30(3): 39-43.
[11] 徐凯健, 曾宏达, 任婕, 谢锦升, 杨玉盛. 亚热带典型红壤侵蚀区人类活动对植被覆盖度及景观格局的影响. 生态学报, 2016, 36(21): 6960-6968.
[12] 孙泉忠, 刘瑞禄, 陈菊艳, 张云平. 贵州省石漠化综合治理人工种草对土壤侵蚀的影响. 水土保持学报, 2013, 27(4): 67-72, 77-77.
[13] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 宣勇, 张伟, 岳跃民. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.
[14] 赵伟, 杨培岭, 李海山, 胡高娃, 刘小平. 呼伦湖流域3种利用方式草场水土及氮磷流失特征. 农业工程学报, 2011, 27(9): 220-225.
[15] Butler D M, Ranells N N, Franklin D H, Poore M H, Green J T. Ground cover impacts on nitrogen export from manured riparian pasture. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(1): 155-162.
[16] 姜志国. 内蒙古达赉湖国家级自然保护区综合考察报告. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2013: 3-337.
[17] 樊才睿, 李畅游, 贾克力, 孙标, 史小红, 高宏斌. 不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留. 生态学报, 2015, 35(14): 4716-4724.
[18] 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 赵光旭, 张鹏宇. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展. 农业机械学报, 2016, 47(6): 67-82.
[19] 樊才睿, 李畅游, 孙标, 史小红, 赵胜男, 付尧, 王静洁. 不同放牧制度草场产流产沙过程模拟试验. 水土保持学报, 2016, 30(1): 47-53.
[20] 叶芝菡, 刘宝元, 符素华, 曾宪勤. 土壤侵蚀过程中的养分富集率研究综述. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 124-130.
[21] 甘艺贤, 戴全厚, 伏文兵, 严友进, 彭旭东. 基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2754-2760.
[22] 张丽萍, 付兴涛, 吴希媛. 竹林坡地径流中泥沙及氮磷载荷特征模拟. 应用生态学报, 2012, 23(4): 881-888.
[23] 佘雕, 吴发启. 坡耕地侵蚀泥沙养分富集规律研究. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 29-31.
[24] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 735-743.
[25] 李卫平, 陈阿辉, 于玲红, 杨文焕, 殷震育, 杨培峰, 焦丽燕. 呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010-2014). 湖泊科学, 2016, 28(2): 281-286.